

다각형 분해와 그래프 기반 경로 병합을 이용한 UAV 커버리지 경로 계획

이윤재¹, 이지성², 박종호³, 서인수⁴¹ 고려대학교 산업경영공학부 학부생² 한서대학교 항공교통물류학과 학부생³ 한국공학대학교 전자공학부 학부생⁴ 메이커펀yunjaerhee@korea.ac.kr, 202100330@hanseo.ac.kr, penaemyo@tukorea.ac.kr,
makerfun.kr@gmail.com

UAV Coverage Path Planning using Polygon Decomposition and Graph-Based Path Merging

Yun-Jae Rhee¹, Ji-Sung Lee², Jong-Ho Park³, Insoo Seo⁴¹Dept. of Industrial and Management Engineering, Korea University²Dept. of Air Transportation and Logistics, Hanseo University³Dept. of Electronic Engineering, Tech University of Korea⁴Makerfun

요 약

무인항공기(UAV)의 자율 수색에서 핵심은 지정 구역을 효율적으로 탐색하는 커버리지 경로 계획(CPP)이다. 기존 수색 방식은 Boustrophedon 은 단순 환경에 적합하지만, 배제 구역이 포함된 복잡한 오목 다각형 환경에서는 한계가 있다. 본 Sweep-line 알고리즘으로 영역을 분할하고, 분할된 영역들의 인접 관계를 그래프로 구성한 뒤 깊이 우선 탐색(DFS)을 통해 최적의 탐색 순서와 병합 단위를 결정하는 CPP 알고리즘을 제안하고 검증하였다.

1. 서론

무인항공기(UAV)는 광범위한 지역의 데이터를 신속하게 수집할 수 있어 지도 제작, 농업, 재난 대응 등 분야에서 핵심 도구로 활용되고 있다. 이러한 응용 분야에서 UAV의 효율성을 극대화하기 위해서는 지정된 관심 영역(Region of Interest, ROI)을 완전히 탐색하기 위한 커버리지 경로 계획(CPP)이 필수적이다.

대표적인 CPP 알고리즘인 Boustrophedon 방식은 단순 볼록 다각형 환경에서는 효율적이지만, 실제 환경은 비행 금지 구역이나 장애물을 포함하는 복잡한 오목 다각형 형태가 많아 적용에 한계가 있다[1]. 그렇기에 작업자가 영역을 수동 분할해야 하므로 비효율적이다. 본 연구는 이러한 문제를 해결하기 위해 자동화된 다각형 분해 기반 CPP 알고리즘을 제안한다.

2. 제안 알고리즘: Polygonal Decomposition 기반 경로

본 연구는 복잡한 ROI(Region of Interest)를 단순 요소로 분해-병합-연결하는 3 단계 경로 생성 알고리즘

을 제안한다. 먼저, 배제 구역(장애물)의 경계를 엄격히 반영하여 UAV가 안전하게 비행할 수 있는 유효 비행 영역을 산출한다. 이후 Sweep-line 기반의 분할 절차를 통해 유효 영역을 다수의 작은 볼록 다각형으로 분해한다. 마지막으로 분할된 요소들에 대해 인접 그래프를 구성하고, 비용 함수(이동 거리 및 페널티)를 기준으로 병합 순서와 연결 순서를 최적화하여, 연속적이며 커버리지 손실이 없는 경로를 생성한다.

2.1. 배제 구역 식별 및 오프셋(Offset) 설정

알고리즘의 첫 단계는 ROI 내부에 존재하는 배제 구역(Hole)을 명확히 정의하고 UAV가 해당 구역의 경계를 침범하지 않도록 안전거리를 확보하는 것이다. 이를 위해 'Straight Skeleton' 방식을 이용한다. 배제 구역 경계로부터 일정 거리만큼 바깥쪽으로 확장된 안전 오프셋(Safety Offset) 다각형을 생성한다[2, 3]. 이때 UAV의 물리적 크기나 GPS 오차 등을 고려한 실질적인 비행 가능 영역을 설정한다.

2.2. Sweep-line 알고리즘을 이용한 분할

다음 단계에서는 배제 구역이 포함된 전체 수색 영역(구멍이 있는 다각형)을 여러 개의 작은 볼록 다각형(Convex set)으로 분할한다. 이를 위해 'Sweep-line' 알고리즘을 적용하였다 [4]. 가상의 수직선(Sweep-line)이 영역을 가로질러 이동하며 다각형의 형태가 바뀌는 지점(Event point)을 기준으로 영역을 분할한다. 특히 수직선의 각도를 바람 방향에 맞추어 설정한다면, 바람 저항을 최소화하는 경로를 생성할 수 있다.

2.3. 인접 그래프 생성 및 경로 병합

분할된 다수의 볼록 다각형들은 독립적인 Boustrophedon 경로를 갖는다. 비행의 연속성과 효율성을 높이기 위해, 소구역을 노드 (N), 공유 경계를 엣지(E)로 하는 그래프($G = (N, E)$)를 구성한다. 이후 그래프에 깊이 우선 탐색(DFS) 알고리즘을 적용하여 모든 소구역을 단 한번씩 방문하는 전체 탐색 경로(Traversal Path)를 생성한다. [5] 이 경로 순서에 따라 인접한 소구역들을 하나의 연속적인 작업 단위(섹션)로 병합하여 최종적으로 길고 연속적인 Boustrophedon 경로를 생성한다.

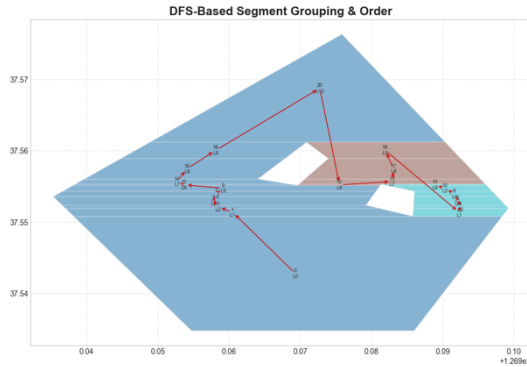


그림 1. ROI DFS 기반 다각형 분할 및 섹션 병합 예시

3. 구현 및 성능 평가

제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 Python 기반의 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 여러 개의 배제 구역을 포함하는 복잡한 오목 다각형 형태의 가상 시나리오를 설정하고, 제안 알고리즘을 통해 커버리지 경로를 생성했다.

추가적으로, 알고리즘의 통계적 성능을 확인하기 위해 100 회 시뮬레이션을 수행하였다. 각 실험은 경도 $126.95^{\circ} \sim 127.00^{\circ}$, 위도 $35.55^{\circ} \sim 35.60^{\circ}$ 범위 내에서 무작위 ROI와 5 개의 배제 구역을 생성하고, 경로 간 간격을 약 20 m(0.00018° 경도 간격), 센서 커버 반경 10 m로 설정하였다. 이후 제안한 분해-병합-연결 절차를 적용하여 경로를 구성하고, 각 회차에서 (i) 커버리지 비율($\geq 1x$)과 (ii) 중복 커버리지($\geq 2x$)를 자유영역 대비 및 덮인 영역 대비로 각각 계산하였다.

실험 결과, 자유영역의 99% 이상이 안정적으로 커버되었으며 ($\mu = 99.41, \sigma = 0.28$), 2 회 이상 중복 커버된 면적은 자유영역 대비 평균 약 8% 수준으로 나타났다 ($\mu = 8.26, \sigma = 3.08$). 이는 제안한 경로가 높은 커버리지와 과도하지 않은 중복 사이의 균형을 효과적으로 달성함을 시사한다.

Metric	Mean	Std	Notes
Coverage ($\geq 1x$)	99.41	0.28	Covered / Free
Overlap ($\geq 2x$) / Free	8.26	3.08	Multiple coverage / Free
Overlap ($\geq 2x$) / Covered	8.32	3.11	Multiple coverage / Covered

표 1. 커버리지 및 중복 커버리지 통계 결과 (100 회) (%)

4. 결론

본 연구는 기존 CPP 알고리즘이 가진 한계를 극복하기 위해, 다각형 분해 기법에 기반한 UAV 커버리지 경로 계획 알고리즘을 제안하였다. 이는 배제 구역이 존재하는 복잡한 환경에서도 별도의 수동 작업 없이 안전하고 효율적인 비행 경로를 자동으로 생성할 수 있다.

이러한 특성은 광범위한 지역에 대한 정밀한 데이터 수집을 요구되는 다양한 분야에 적용 가능하며, 특히 신속하고 체계적인 상황 파악이 중요한 해상 조난 사고 수색, 산불 수색 등 재난 지역 감시 등의 임무에서 UAV의 활용 가치를 크게 높일 것으로 기대된다.

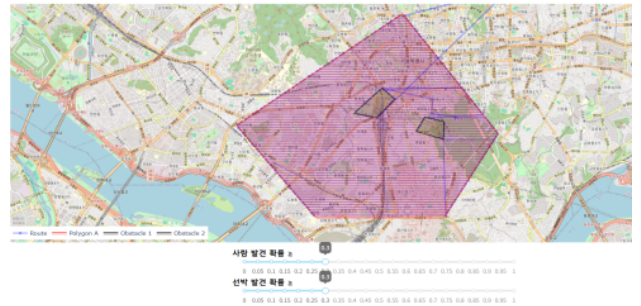


그림 2. 실제 UAV 수색 시 경로 시각화 화면 예시

ACKNOWLEDGEMENT

※ 본 논문은 해양수산부 스마트 해운물류 융합인재 및 기업지원(스마트해운물류 x ICT 멘토링)을 통해 수행한 ICT 멘토링 프로젝트 결과물입니다.

참고문헌

- [1] S. T. Shahid, S. M. A. Siddique, and M. M. Alam, "UAV survey coverage path planning of complex regions containing exclusion zones," arXiv preprint arXiv:2411.07053, 2024.
- [2] S. Huber and M. Held, "A fast straight-skeleton algorithm based on generalized motorcycle graphs," International Journal of Computational Geometry and Applications, vol. 22, no. 5, pp. 471-498, 2012.
- [3] D. S. Kim, "Polygon offsetting using a Voronoi diagram and two stacks," Computer-Aided Design, vol. 30, no. 14, pp. 1069-1076, 1998.
- [4] M. Coombes, T. Fletcher, W. H. Chen, and C. Liu, "Optimal Polygon Decomposition for UAV Survey Coverage Path Planning in Wind," Sensors, vol. 18, no. 7, p. 2132, 2018.
- [5] T. Oksanen and A. Visala, "Coverage path planning algorithms for agricultural field machines," Journal of Field Robotics, vol. 26, no. 8, pp. 651-668, 2009.